九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

織込部交通流の渋滞改善

西，遼佑
東京大学大学院工学系研究科

三木，弘史
さくらアカデミア株式会社

友枝，明保
東京大学大学院工学系研究科

西成，活裕
東京大学大学院工学系研究科 | 東京大学工学研究科、科学技術振興機構さきがけ

https://doi.org/10.15017/14291

出版情報：応用力学研究所研究集会報告. 20ME-S7 (19), 2009-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

応用力学研究所研究集会報告 No.20ME-S7
「**非線形波動の数理と物理**」（研究代表者　矢嶋　徹）
共催　九州大学グローバル COE プログラム
「マス・フォア・インダストリ教育研究拠点」

Reports of RIAM Symposium No.20ME-S7
Mathematics and Physics in Nonlinear Waves
Proceedings of a symposium held at Chikushi Campus, Kyushu Universiy,
Kasuga, Fukuoka, Japan, November 6 - 8, 2008

Co-organized by
Kyushu University Global COE Program
Education and Research Hub for Mathematics - for - Industry

Article No. 19 (pp. 122-126)

織込部交通流の渋滞改善

西 遼佑 (NISHI Ryosuke), 三木 弘史 (MIKI Hiroshi), 友枝 明保 (TOMOEDA Akiyasu), 西成 活裕 (NISHINARI Katsuhiro)

（Received February 3, 2009）

Research Institute for Applied Mechanics
Kyushu University
February, 2009

織込部交通流の渋滞改善

西遼佑 [1]　三木弘史 [2]　友枝明保 [1]　西成活裕 [1,3]
[1] 東京大学大学院工学系研究科　[2] さくらアカデミア株式会社
[3](独) 科学技術振興機構 さきがけ
R. Nishi[1], H. Miki[2], A. Tomoeda[1], and K. Nishinari[1,3]
[1]Faculty of Engineering, University of Tokyo, [2]SAKURA ACADEMIA Co.
[3]PRESTO, Japan Science and Technology Corporation

概要

織込部交通流の渋滞の改善策として、二車線上で車を交互配置化する方法を提案する。セルオートマトンを用いて交互配置化の指標を定義し、その空間変化をシミュレーションと理論解析とを用いて評価する。

1　研究背景

交通流の研究は、理学的な観点および工学的な観点から近年ますます盛んに行われている [1] [2]。交通流の基本である一車線交通流の研究は、連続モデル [3] や Cellular Automaton (CA) [4] などで発展してきた。より複雑な合流部や織込部における流れの研究も、渋滞改善の観点から発展が期待されている。合流のある流れの先行研究としては、ゲーム理論を用いたもの [5]、Agent Based Simulation を用いたもの [6]、および Optimal Velocity Model [3] に車線間相互作用を付加したもの [7] などが挙げられるものの、いずれも、合流が行われる際のミクロな車の配置の変化を詳細に解析していない。しかしながら、車の配置関係は合流の効率を決定付けるものであり、中でも交互配置状態は、二車線上の車がかわりばんこに合流するジッパー合流を実現するため、最も効率の良い配置状態であると考えられる。ゆえに、車の配置状態を交互配置状態へと遷移することは、合流部流れを改善する上で大きな意義があると考えられる。

本研究の目的は、二車線上の車の交互配置状態を達成する簡潔な方法を提案することである。この提案を、CA による Simulation と、Cluster 近似による理論解析とで評価する。Simulation では、二車線間で相互作用のあるモデルとして Multiple Lanes Stochastic Optimal Velocity (MLSOV) model を用いる。このモデルは、Stochastic Optimal Velocity (SOV) model [8] に車線間相互作用を付加したモデルである。

2　交通流モデル

ここでは、MLSOV model について説明する。MLSOV model は、二車線上の車の配置の変化を、一方の車線上の車が反対車線の車を見ながら運転することで起こる現象であると想定する。なお、本研究では合流前の車の交互配置化達成のみに注目しているため、二車線間の車線変更は考慮されていない。このモデルにおいて、車 i は、直前 cell が空の場合のみ、1step で確率 v_i^t で 1cell だけ移動する (図 1)。

$$x_i^{t+1} = \begin{cases} x_i^t + 1, & \text{with probability } v_i^t \\ x_i^t, & \text{with probability } 1 - v_i^t, \end{cases} \tag{1}$$

v_i^t は intension と呼ばれる物理量 [8] であり、v_i^t は反応パラメータ $0 \le a \le 1$ を介して $V(\Delta x_{1i}^t, \Delta x_{2i}^t)$

に近づくように時間変化する。

$$v_i^{t+1} - v_i^t = a\left\{V(\Delta x_{1i}^t, \Delta x_{2i}^t) - v_i^t\right\}, \qquad (2)$$

ここで、$V(\Delta x_{1i}^t, \Delta x_{2i}^t)$ は Optimal Velocity(OV) 関数 [3] であり、その引数たる自車線車間距離 Δx_{1i}^t ならびに他車線車間距離 Δx_{2i}^t に対する理想速度を表す。以降、$V(\Delta x_{1i}^t, \Delta x_{2i}^t)$ を

$$V(\Delta x_{1i}^t, \Delta x_{2i}^t) = \begin{cases} 0, & \Delta x_{1,i}^t = 0 \\ r, & \Delta x_{1,i}^t \geq 1 \text{ and } \Delta x_{2,i}^t = 0 \\ q, & \Delta x_{1,i}^t \geq 1 \text{ and } \Delta x_{2,i}^t = 1 \\ p, & \Delta x_{1,i}^t \geq 1 \text{ and } \Delta x_{2,i}^t \geq 2. \end{cases} \qquad (3)$$

のように決定する。MLSOV model は、$a = 0$ の場合は単車線 Asymmetric Simple Exclusion Process (ASEP) [9] に相当し、$a = 1$ の場合は二車線 Zero Range Process (ZRP) [10] に相当する。

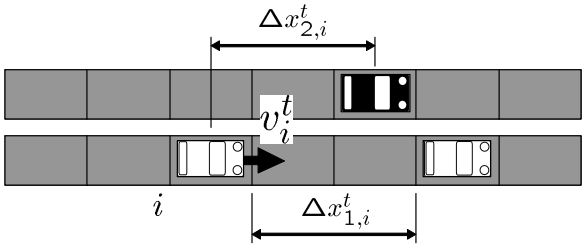

図 1 The movement of i-th vehicle obeying MLSOV model. i-th vehicle on each lane moves one cell in front in one time step with probability v_i^t at time t provided that the next cell is empty. $\Delta x_{1,i}^t$ is the distance between i-th vehicle and the nearest vehicle ahead of it on the same lane, $\Delta x_{2,i}^t$ is the distance between i-th vehicle and the nearest vehicle shead of it on the opposite lane.

3 Simulation および理論解析

本研究における合流を改善する方法は、図 2 (a)-(b) のように二車線間に区画線を引くことである。この区画線は車の車線変更を禁ずる線であり、交互配置化を促進し、乱雑な車線変更をスムーズな車線変更に変化させると期待される。区画線を引いた箇所は、図 2 (c) のように両端が開放された cell 状に区切られる。各車は parallel に update され、左端から流入し、車線変更せずに右端から流出する。車線変更はしないながらも、各車は反対車線上の車の動きを見て相互作用する。Simulation にあたり、最も交互配置化から離れた左端流入条件を採用し、交互配置化の評価を行う。これは、左端 $x = 0$ の両車線上の cell が空の場合のみ、確率 α で二車線に同時に流入する条件である。他のパラメータは、図 2 中に定義される。各 lane $j(j = 1, 2)$ の cell 数は d であり、左端は $x = 0$、右端は $x = d - 1$ である。右端流出確率は、β_j である。

続いて、Simulation における測定量を定義する。交互配置化の物理量として、$Geminity(Ge)$ を定義する。Ge は座標 x の関数であり、$Ge(k)$ は、$x = k$ に車が存在する場合に、そのような車の中でどれだけの車が交互配置状態、すなわち、$\Delta x_{1,i}^t \geq 1$ かつ $\Delta x_{2,i}^t \geq 2$ の状態を達成しているのかを表現する。$Ge(k)$ は、図 3 のような $x = (k, k+1)$ における 10 状態 $S(j)(j = 1, \ldots, 10)$ を数え上げて計算される。なお、二車線間の対称性は考慮されている。10 状態のうちで、$x = k$ に車が存在するものは $S(n)$ $(n = 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10)$ である。そのうちで、完全な交互配置状態 (図 4) が達成されるのは $S(3)$ のみである。ゆえに、$Ge(k)$ は、$c(j)_k$ を $S(j)$ が数え上げられた回数として、

$$Ge(k) = c(3)_k / \big(c(3)_k + c(5)_k + c(6)_k + c(7)_k + c(8)_k + c(9)_k + c(10)_k\big). \qquad (4)$$

のように与えられる。$0 \leq Ge(k) \leq 1$ であり、$Ge(k)$ が 1 に近いほど交互配置の達成度は高い。

次に、Cluster 近似を用いた交互配置化の理論解析方法を定義する。この近似では、図 2 (c) 中の二車線道路を、$x = (k, k+1)(k = 0, 1, 2, \ldots, d-2)$ における 4cell に分割する。この 4cell を C_k とおき、C_k の定常配置状態を $k = 0, 1, 2, \ldots, d-2$ の順に計算す

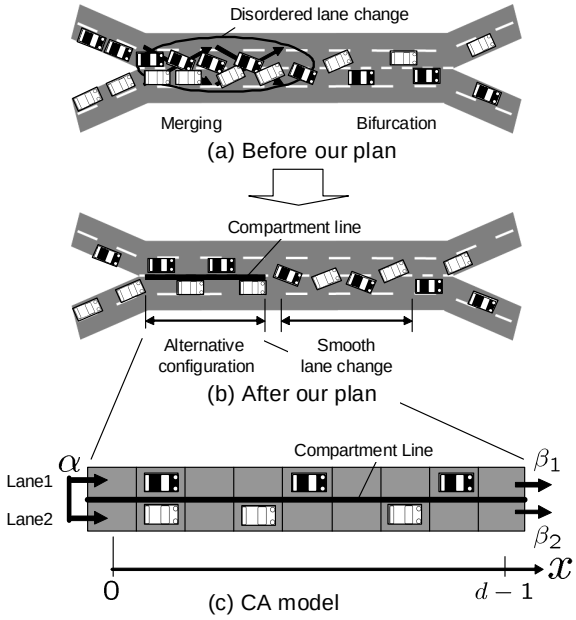

図 2　(a) An example of traffic flow on a weaving section before acting our plan to draw a compartment line at the merging area. Disordered lane changes cause traffic congestion at the merging area. (b) An example of traffic flow after acting our plan. The line prohibit vehicles from changing lanes, and is expected to make smooth lane changes by achieving alternative configurations. (c) CA model of a two-lane road which contains the line. Each vehicle enters in the cell at $x = 0$ on both lane 1 and lane 2 simultaneously with the probability α, and goes out of the cell at $x = d - 1$ with the probability β_i $(i = 1, 2)$.

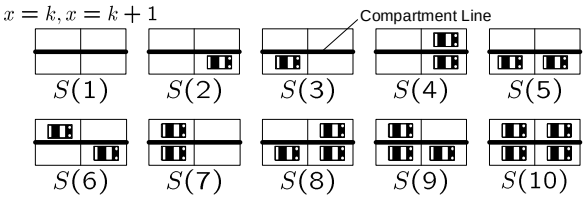

図 3　10 kinds of the state labelled by $S(n)$ in the four cells at $x = \{k, k+1\}$. The symmetry between lane 1 and lane 2 is taken into account.

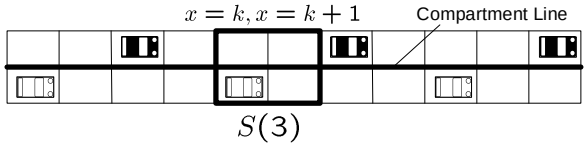

図 4　The perfect alternative configuration on the two-lane road. When at least one vehicle exists at $x = k$, only $S(3)$ represents this perfect alternative configuration.

る。その計算にあたり、時刻 t における C_k の状態ベクトルを $\mathbf{\Pi}_k^t = \{\Pi(1)_k^t, \Pi(2)_k^t, \ldots, \Pi(10)_k^t\}$ と定義する。ここで、$\Pi(n)_k^t$ $(1 \leq n \leq 10)$ は、時刻 t において C_k が状態 S_n を取る確率である。C_k における状態遷移は、状態遷移行列 $\mathbf{P}_k$ を介して下記のように与えられる。

$$\mathbf{\Pi}_k^{t+1} = \mathbf{P}_k \mathbf{\Pi}_k^t. \tag{5}$$

従って、C_k における定常状態 $\mathbf{\Pi}_k^\infty$ は、$\mathbf{\Pi}_k^\infty = \mathbf{P}_k \mathbf{\Pi}_k^\infty$ の解として与えられる。$\mathbf{P}_k$ の表現の詳細は、参考文献 [11] に掲載する。

Simulation と Cluster 近似を用いて、$Ge(x)$ と平均 intension の空間分布を出力する。設定条件は、下記の通りである。OV 関数のパラメータを、$p = 1$ および $(q, r) = (0.8, 0.8)$ に設定する。4 種類の反応パラメータを、$a = \{0.001, 0.01, 0.1, 1\}$ のように用意する。各 lane の cell 数は、$d = 100$ とする。左端での並走流入確率は、$\alpha = 0.05$ とする。右端流出確率 β_i $(i = 1, 2)$ は、右端における各車の intension とする。これらの境界条件では、流れは常に自由流に保たれる。同一条件での Simulation 回数は 10 回に設定し、各 Simulation での測定時間帯は、$100000 \leq t < 200000$ とする。

結果を図 5 に示す。いずれの結果も、Simulation と Cluster 近似とで非常に良い一致が見受けられる。Simulation と Cluster 近似ともに、$Ge(x)$ は空間方向に単調増加している。これは、local な相互作用で交互配置状態が達成されることを意味する。反応パ

ラメータ a が大きいほど $Ge(x)$ の増加が急になる。$Ge(x)$ の計算結果は、交互配置化の達成するための区画線の長さを知る上で、道路設計上大きな意義があると考えられる。なお、$p > q$、$p > r$ の条件を付加することにより、各車は隣接車線上の車によって減速するが、この減速は、道路上の密度が十分小さい場合において、流量を減少させないことを Appendix に追記する。

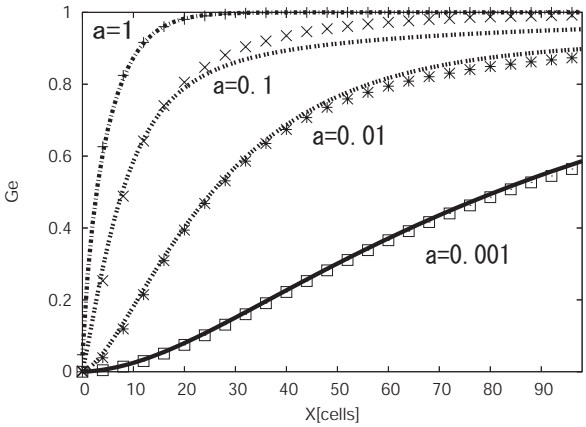

図 5 Ge versus x obtained from simulations, and from the four cluster approximation. The results of simulations are represented by points, and those of four cluster approximation are represented by lines. The results of simulations and those of four cluster approximation agree with each other very well. $Ge(x)$ increases monotonically as x increases, and the sharpness of the increase of Ge becomes larger as a becomes larger.

4 結論

本研究では、区画線を引いて交互配置状態を励起し、合流部流れを改善する方法を提案した。Simulation と Cluster 近似とを用いて交互配置化の達成度を解析したところ、両者の結果は非常に良く一致した。この結果は、合流部の設計に大きく寄与することが期待される。

付録 A 減速的車線間相互作用と、流量の関係

本稿で導入した減速的車線間相互作用 ($p > q$,$p > r$) が、自由流において流量を減少させないことを示す。まず、図 6 のような二車線道路モデルを用意する。この道路は二つの部分からなる。第一部分は合流前の二車線であり、これを走行中の車は、隣接車線上の車を見ることができないため、相互作用しない。すなわち、MLSOV model において $\Delta x^t_{2,i} = \infty$ である。第二部分は、合流部分であり、二車線間に区画線が引かれ、各車は隣接車線上の車と相互作用する。

各車は第一部分の左端から入り、車線変更せずに第二部分の右端から出て行く。第一部分の道路長は d_0、第二部分の道路長は d_1 である。左端流入条件は、本論と同様に並走流入条件であり、その確率は α である。車線 $i(i = 1, 2)$ の右端流出確率は β_i である。

Simulation により、左端の呼損率と α との関係を出力する。Simulation 条件は、下記の通りである。MLSOV model のパラメータは、$p = 1$、$(q, r) = (0.5, 0.5)$、$a = \{0.001, 0.01, 0.1, 1\}$ のように与える。道路長は $d_0 = d_1 = 100$ である。流入時の初期 intension は p とする。右端流出確率 β_i $(i = 1, 2)$ は、$x = d_0 + d_1 - 1$ における各車の v とする. 同一条件での試行回数は 1 回、計測時間は $100000 \leq t \leq 200000$ とする.

結果を図 7 に示す。$\alpha < 0.15$ では、呼損率は反応度 a によらないことが見受けられる。この呼損率の a に対する非依存性は、自由流において、減速的な車線間相互作用は流量を減少させないことを示している。なお、$a = 0.1$、 $a = 0.01$ の場合では、$\alpha > 0.15$ において呼損率の急激な上昇が見受けられる。これは、渋滞の発生によるものである。

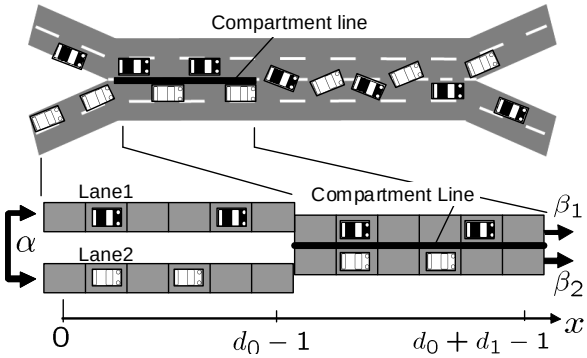

図 6　The two-lane road partitioned into identical cells. This is composed of two parts. The first part is the two-lane road before merging. Vehicles on it can not see other vehicles on the opposite lane, and does not interact with them. The second part is the two-lane road in the merging section, and is drawn the compartment line.

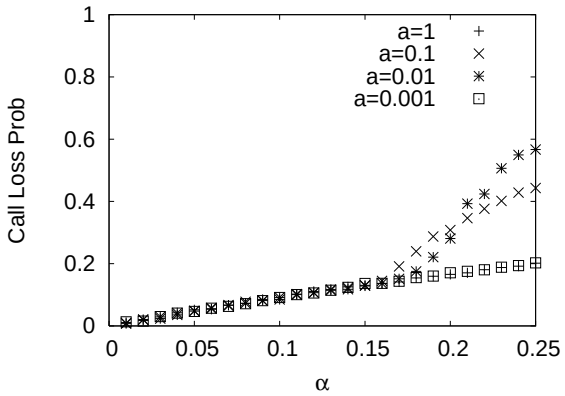

図 7　Call loss probability of the injection versus α obtained by the simulations. This probability is same irespective of the response parameter a at $\alpha < 0.15$. The sharp increase of this probability in the case of $a = 0.1$, and $a = 0.01$ at $\alpha > 0.15$ means that the congestion occurs.

参考文献

[1] D. Helbing, Rev. Mod. Phys. 73 1067 (2001).

[2] D. Chowdhury, L. Santen, and A. Schadschneider, Phys. Rep. 329, 199 (2000).

[3] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama, Phys. Rev. E 51, 1035 (1995).

[4] M.R. Evans, N. Rajewsky and E.R. Speer, J. Stat. Phys. 95, 45 (1999).

[5] H.Kita, Transportation Research Part A 33 3, 305-312 (1999).

[6] P.Hidas, Transportation Research Part C 13 37-62 (2005).

[7] L.C. Davis, Physica A: Statistical Mechanics and its Applications Volume 361, Issue 2, Pages 606-618 (2006).

[8] M. Kanai, K. Nishinari, and, T. Tokihiro, Phys. Rev. E 72, 035102(R) (2005).

[9] B. Derrida, E. Domany and D. Mukamel, J. Stat. Phys. 69, 667 (1992).

[10] F. Spitzer, adv. Math. 5 246-290 (1970).

[11] R. Nishi, Master Thesis in the University of Tokyo, 2008, in preparation.